

論文 コンクリートに埋め込まれたあと施工アンカーの引抜き特性に及ぼす高温加熱の影響

刈田 祥彦*1・松沢 晃一*2・橘高 義典*3・八木沢 康衛*4

要旨：本研究では、8種のあと施工アンカーが施工されたコンクリート供試体を常温から1000℃までの高温環境下に曝した後に引抜き試験を行い、あと施工アンカーの引抜き特性に及ぼす高温加熱の影響について検討を行った。その結果、拡張式、拡張底式アンカーに接着剤を併用することで、初期剛性および最大荷重が高くなり、かつ、加熱により接着剤の付着強度が低下しても、アンカーの支圧による固着力により、ある程度の荷重を保つことができることが明らかとなった。

キーワード：コンクリート、高温加熱、あと施工アンカー、引抜き特性

1. はじめに

あと施工アンカー（以下、アンカー）である金属系アンカーは、既に硬化したコンクリート母材にドリル等で穿孔し、アンカーの芯もしくは外周部を打込んで物理的にコンクリートに固着するアンカーであり、接着系アンカーは、穿孔に接着剤を充填し、定着部全体を固着させるアンカーである¹⁾。あと施工アンカーは位置決めが正確にでき、施工が簡単であることなどの特徴から、既存のコンクリート構造物の耐震補強工事や、設備機器の取り付けなどへの需要が増加している。

コンクリート構造物は供用期間中に様々な劣化因子の作用を受けるが、その劣化因子の一つに熱がある。発電所や工場などは、長期にわたり熱の影響を受ける場合がある。そのような熱を受ける構造物の安全性を確保するためには、高温加熱を受けたコンクリートの挙動を把握することが重要である。そのため、熱の影響を受けたコンクリートの物性に関しては多くの検討がなされており、コンクリートは熱による影響を受け、強度変化や収縮、膨張などが生じることが報告されている²⁾。コンクリート構造物に使用されているアンカーの引抜き特性は、コンクリートの性質の影響を受ける^{3),4)}。そのため、加熱によるコンクリートの強度低下や性状変化はアンカーの引抜き特性を検討する上でも重要となる。

頭付きアンカーや接着系アンカーについては、熱に関する検討がなされている^{5),6)}。しかしながら、これらのアンカーの熱に関する検討は少なく、また、これらのアンカーと同様に多く用いられている金属系アンカーの熱に関する検討はなされていないのが現状である。

本研究では、あと施工アンカーである金属系アンカー、接着系アンカー、金属系アンカーに接着剤を併用したア

ンカーが施工されたコンクリートを、常温から1000℃までの高温環境下に曝した後にアンカーの引抜き試験を行い、高温加熱後のあと施工アンカーの引抜き特性について検討を行なった。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

表-1 に使用材料、表-2 に調合を示す。コンクリートは、既往の研究⁷⁾と同様に、レディーミクストコンクリート工場（神奈川県相模原市）の2軸強制練りミキサ（公称容量1.7m³）を用いて製造された、呼び強度27、目標スランプ18cm、目標空気量4.5%のものを用了。

供試体は、各試験条件につき、圧縮強度およびヤング係数測定用供試体（φ100×200mm）3体、アンカーの引抜き試験用供試体（φ300×100mm）3体とした。アンカーは、引抜き試験用供試体のコンクリート打込み表面の中心に1本施工し（図-1）、試験した。供試体は、材齢26週まで標準養生を行い、その後材齢52週まで気中養生を行った後、加熱および各試験を行った。表-3 にコンクリートのフレッシュ性状と強度試験結果を示す。

表-4 にアンカー概要、写真-1 に使用アンカーを示す。使用アンカーは金属系アンカーの拡張式と拡張底式、全ネジの3種であり（3種ともスチール製、アンカー径10mm）、接着剤は樹脂系接着剤のビズフェノール A/F 型エポキシ樹脂とセメント系接着剤の急硬セメント系注入方式の2種を用いた。拡張式はアンカー本体に挿入される芯棒を打込んで拡張部を開かせる構造であり、拡張底式はアンカー拡張部に相当する位置に拡大穴を穿孔し、アンカー拡張部をこの拡大穴に適合させて拡張できるような構造である¹⁾。拡張式、拡張底式アンカーは接着剤

*1 前田建設工業 技術研究所（正会員）

*2 建築研究所 博士（工学）（正会員）

*3 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科建築学域 教授 工博（正会員）

*4 サンコーテクノ（株）

表-1 使用材料

材料	種類	記号	物性
セメント	普通ポルトランドセメント	C	密度 3.16 g/cm ³
細骨材	硬質砂岩砕砂（相模原産）	S1	表乾密度 2.63g/cm ³ , 粗粒率 3.00
	硬質砂岩砕砂（八王子産）	S2	表乾密度 2.63g/cm ³ , 粗粒率 3.00
	山砂（富津産）	S3	表乾密度 2.63g/cm ³ , 粗粒率 1.60
粗骨材	硬質砂岩砕石（相模原産）	G1	表乾密度 2.66g/cm ³ , 実積率 60.0
	硬質砂岩砕石（八王子産）	G2	表乾密度 2.66g/cm ³ , 実積率 60.0
混和剤	高性能 AE 減水剤	Ad	ポリカルボン 酸系化合物

表-2 調合

W/C (%)	s/a (%)	質量(kg/m ³)								
		W	C	S1	S2	S3	G1	G2	Ad	
56.8	49.0	175	309	351	307	220	463	463	2.78	

表-3 フレッシュ性状および強度試験結果

スランブ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度(N/mm ²)		ヤング係数(kN/mm ²)	
		4週標準	52週気中	4週標準	52週気中
19.0	4.3	28.2	38.7	25.8	28.0

表-4 アンカー概要

記号	アンカー	接着剤
全ネジ-E	全ネジ	樹脂系接着剤
全ネジ-C	全ネジ	セメント系接着剤
拡張式-N	拡張式	なし
拡張式-N	拡張式	なし
拡張式-E	拡張式	樹脂系接着剤
拡張式-E	拡張式	樹脂系接着剤
拡張式-C	拡張式	セメント系接着剤
拡張式-C	拡張式	セメント系接着剤

を併用しないものと併用するもの、全ネジは接着剤を用いたものの計 8 種（全ネジ-E、全ネジ-C、拡張式-N、拡張式-E、拡張式-C、拡張式-N、拡張式-E、拡張式-C）とした。なお、アンカーの埋込み長さは 50mm とした。

2.2 試験方法

(1) 加熱方法

図-2 に加熱履歴を示す。供試体加熱時の炉内最高温度（以下、加熱温度）は 100, 200, 300, 500, 800, 1000℃ の 6 通りとし、比較のため 20℃（常温）での試験も行った。加熱には、プログラム調整器付きマッフル炉（炉内寸法 W310×D610×H310mm, 左右 2 面加熱）を用いた。炉内の昇温速度は、供試体表面と内部中央との温度差がなるべく小さくなるように 0.5℃/min とした。炉内温度が目標温度に達した後は、その温度を 1 時間保持し、加熱を終了した。加熱終了後は、供試体の温度が外気温度と同程度となるまで炉内にて自然除熱後、直ちに各試験を行った。また、あらかじめ K 型熱電対を埋め込んだ供試体を、昇温速度 0.5℃/min で 1000℃まで加熱し、供試体内部の温度を計測した。図-3 に供試体内部の測定点、図-4 に温度測定結果を示す。加熱中は、コンクリート

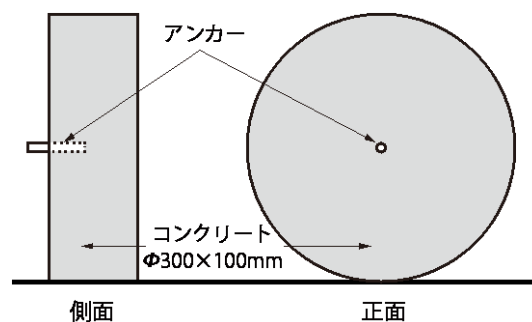


図-1 引抜き試験用供試体概要



写真-1 使用アンカー

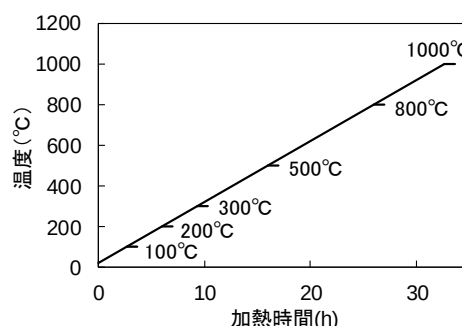


図-2 加熱履歴

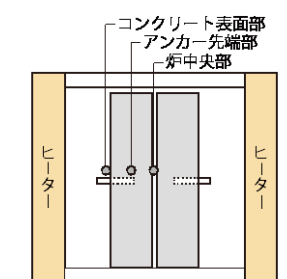


図-3 供試体の温度測定点

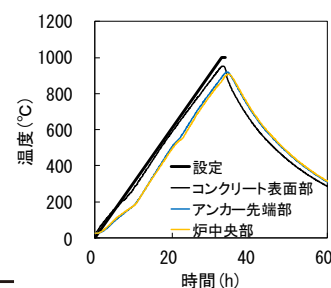


図-4 温度測定結果

の表面と内部の最大温度差は 100℃程度で温度上昇し、除熱中は最大温度差 70℃程度であった。また、炉内温度が 1000℃に達してもコンクリート表面の温度は 1000℃には至らず、950℃程度であった。

(2) 圧縮強度試験

圧縮強度試験は、JIS A 1108 に準じて行った。また、同時にコンプレッソメーターを用いてヤング係数を測定した (JIS A 1149 コンクリートの静弾性係数試験方法)。

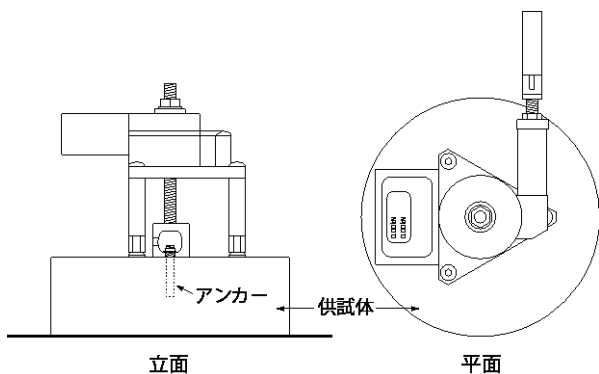


図-5 引抜き試験概要

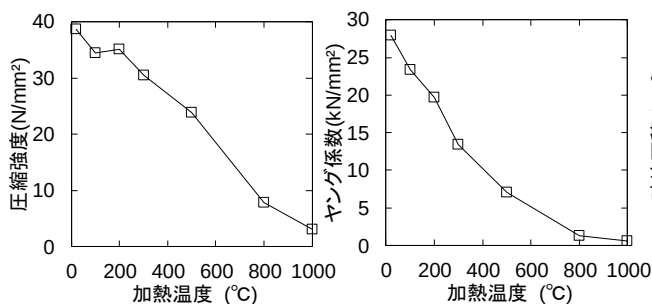


図-6 圧縮強度と加熱温度の関係

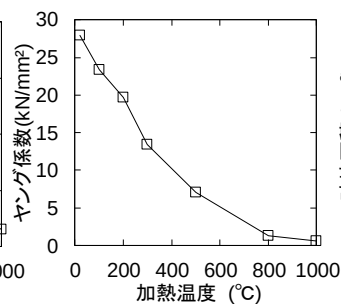


図-7 ヤング係数と加熱温度の関係



写真-2 引抜き破壊形状

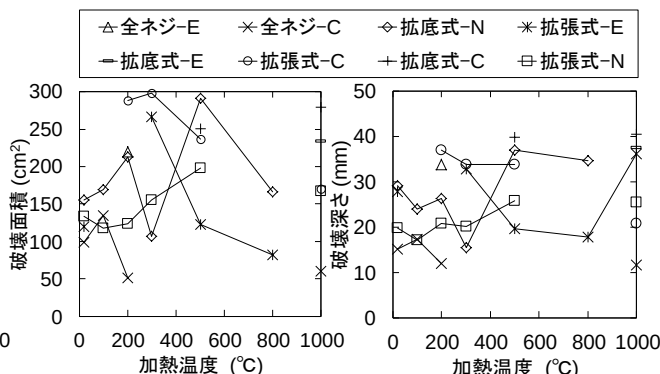


図-8 破壊面積と加熱温度の関係

図-9 破壊深さと加熱温度の関係

(3) 引抜き試験

図-5 に引抜き試験概要を示す。アンカーの引抜きには油圧式引張試験機を用い、アンカー引抜き試験時の荷重および変位を測定した。また、アンカー引抜き後の破壊特性を評価するため、アンカー施工表面における破壊面積、破壊深さ、引抜き後のアンカー最大拡張部の径を測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 コンクリートの力学特性

図-6 に圧縮強度と加熱温度の関係を示す。圧縮強度は、加熱温度 100℃で低下し、200℃で強度が増加し、その後は加熱温度の上昇とともに低下している。

図-7 にヤング係数と加熱温度の関係を示す。ヤング係数は 20℃で最大となり、加熱温度の上昇とともに低下している。

3.2 アンカーの引抜き特性

(1) 破壊特性

写真-2 に供試体の引抜き破壊形状を示す。接着剤を用いていないアンカーでは、ほとんどの供試体で逆富士状破壊（コーン状破壊）となったが、接着剤を用いたアンカーでは割裂破壊が多数みられた。また、接着剤を用いたアンカーでは、加熱温度 20℃、100℃でアンカーの破断も確認された。接着剤を用いていないアンカーに比べて、接着剤を用いたアンカーの方がコンクリートとの

固着力が高くなったと考えられる。また、試験体がより大きければ、割裂破壊は生じにくくなることが予想されるため、以降の考察では割裂破壊におけるデータは除くこととする。

図-8 にコンクリート表面の破壊面積と加熱温度の関係、図-9 に破壊深さと加熱温度の関係を示す。破壊面積は、逆富士状破壊面の水平投影面積であり、破壊深さは、逆富士状破壊した際にアンカーに付着していたコンクリート塊の長さとした。破壊面積、破壊深さともに加熱温度との関係について、明確な傾向はみられない。これは、高温加熱によりコンクリートの性状が変化し、特に、供試体の表層部における変化が大きいためであると考えられる。なお、グラフは逆富士状破壊となった供試体の平均値を示したものであるが、同条件下でもばらつきが大きかった。

写真-3 に加熱後のアンカーの例として、引抜き後の拡底式アンカーを示す。接着剤を用いていないアンカーでは、アンカー表面に施されているメッキの変色を確認された。また、メッキの膨張やそれに伴うメッキの剥がれも確認された。樹脂系接着剤を用いたアンカーでは、200℃から樹脂系接着剤による変色を確認された。また、500℃を超えると樹脂系接着剤は分解し、粉状となった。セメント系接着剤を用いたアンカーでは、加熱温度の上昇とともにアンカー表面のセメント系接着剤の付着量が増加した。加熱によるセメント系接着剤の収縮により、



写真-3 加熱および引抜き試験後の拡底式アンカー

セメント系接着剤とコンクリート界面の付着強度の低下し、破壊が接着剤とコンクリート界面で生じやすくなったと考えられる。

図-10 に引抜き後のアンカーの最大拡張部の径と加熱温度の関係を示す。拡底式-N では、加熱温度が高くなるにつれて、最大拡張部の径が大きくなる傾向がみられた。加熱温度 20℃から 300℃までは引抜き時にすべりを生じ、アンカーの拡張部に変形が生じるが、300℃以降は加熱温度の上昇とともにコンクリートの強度が低下し、すべりが生じる前に破壊が進展することで、アンカーの拡張部が保たれたと考えられる。その他のアンカーでは、拡張部の径に大きな変化は確認されず、高温加熱によってアンカー拡張部が、収縮や膨張などの影響を受けることはないと考えられる。

(2) 引抜き特性

図-11 に各加熱温度における各種アンカー引抜き時の荷重-変位曲線を示す。全ネジ-E は、加熱温度 500℃以降において残存荷重がほぼ 0kN となっている。加熱温度 300℃を超えると樹脂系接着剤が分解し、アンカーとコンクリートの付着が得られなくなることがわかる。

全ネジ-C は、加熱温度 500℃以降でも、ある程度の荷重を保っている。また、最大荷重後の荷重低下が緩やかである。全ネジ-C は、接着剤とコンクリート界面での付着破壊であり、セメント系接着剤は加熱による体積減少をほとんど生じないことから、接着剤による付着力が低下しても、硬化した接着剤とコンクリート界面との摩擦によりある程度の荷重が保たれたと考えられる。

拡張式-N は、荷重上昇後、荷重を保ったまま変位が増大している。ある程度まで荷重が上昇すると、アンカーとコンクリート界面ですべりが生じると考えられる。

拡底式-N は、荷重上昇後、加熱温度 20℃、100℃で多少のすべりは生じているが、加熱温度 200℃以降ではすべりが少ない。加熱温度が上昇するにつれてコンクリートの圧縮強度が低下し、最大荷重後にすべりを生じることなく破壊が進行しやすくなったためと考えられる。

拡張式-E、拡底式-E は加熱温度 500℃以降において、拡張式-N、拡底式-N とグラフの形状が酷似している。加熱温度 500℃以降では、樹脂系接着剤の分解が生じ、アンカー拡張部の支圧力のみでの固着になったと考え

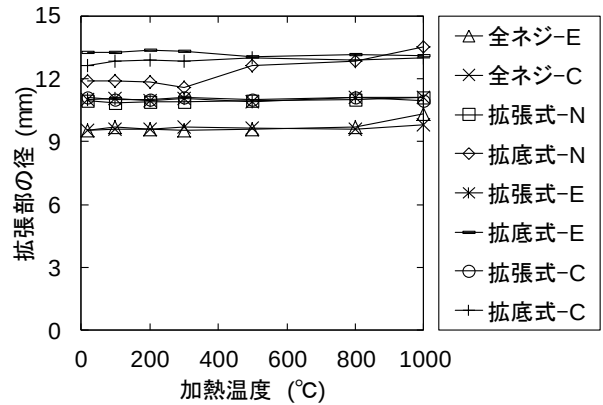


図-10 拡張部の径と加熱温度の関係

られる。このことから、接着系アンカーのアンカー本体に金属系アンカーを用いることで、加熱により接着剤の付着強度が低下しても、ある程度の荷重を保つことができることがわかる。

拡張式-C、拡底式-C は、拡張式-E、拡底式-E と比べて加熱温度 500℃以降での残存荷重が高くなっている。セメント系接着剤は加熱により体積減少をほとんど生じないため、アンカーとコンクリートとの隙間を埋めることにより引抜きに対する摩擦力が増加したと考えられる。

図-12 に各種アンカーにおける最大荷重と加熱温度の関係を示す。データが示されていない箇所は供試体が割裂破壊し、正確にアンカーの引抜きにおける最大荷重が計測できなかったためである。全ネジ-C は加熱温度 200℃で急激に荷重が低下している。加熱でのセメント系接着剤の収縮による付着強度の低下の影響が、加熱温度 100℃を超えると大きくなったと考えられる。

各種拡張式、拡底式アンカーの最大荷重は、加熱温度 20℃から 300℃まではあまり変化せず、500℃を超えると急激に低下している。加熱温度 800℃以降では、加熱後のコンクリート表面に多数のひび割れを確認できたことから、このひび割れが加熱温度 800℃での大幅な荷重低下に影響を与えていると考えられる。

拡張式、拡底式アンカーにおいて、接着剤を併用すると接着剤を併用していないアンカーと比べて、最大荷重が高くなっている。金属系アンカーに接着剤を併用することで、アンカーの固着力を増加させることができると

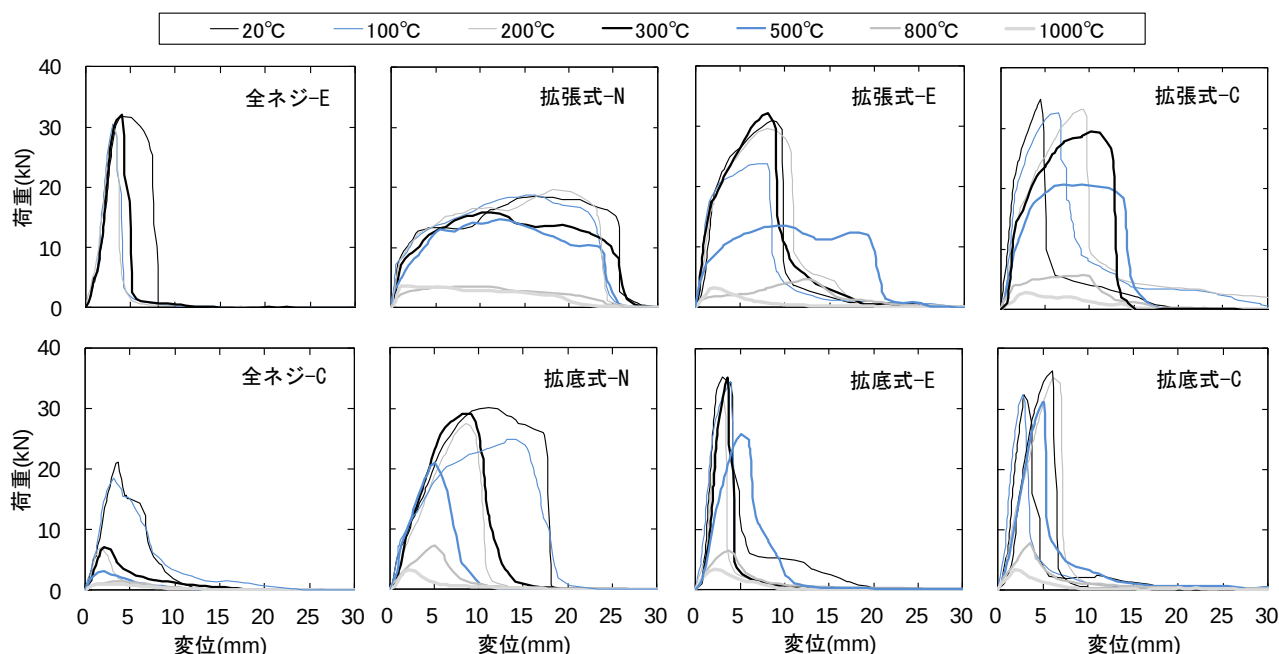


図-11 各加熱温度における各種アンカー引抜き時の荷重-変位曲線

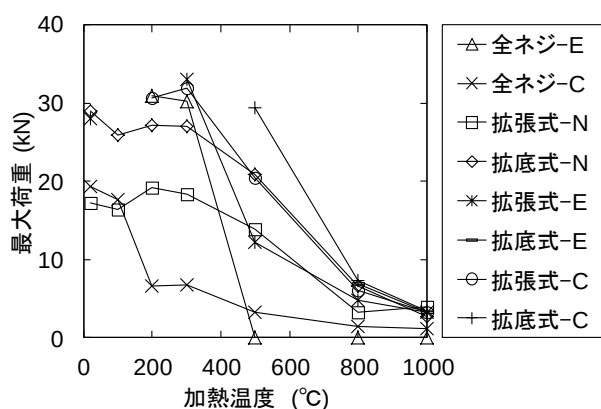


図-12 最大荷重と加熱温度の関係

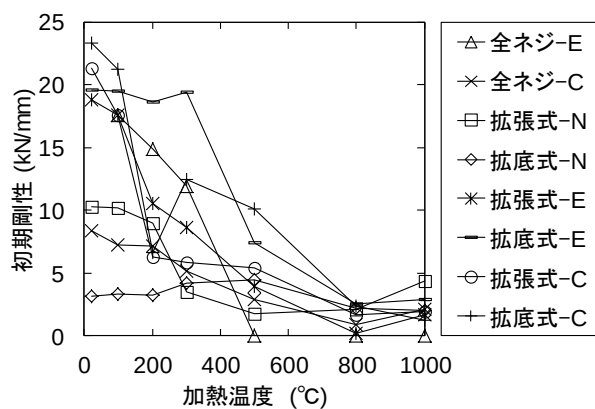


図-13 初期剛性と加熱温度の関係

考えられる。

図-13 に各種アンカーにおける初期剛性と加熱温度の関係を示す。ここでの初期剛性とは、荷重-変位曲線の載荷初期の勾配であり、荷重-変位曲線は、最大荷重の1/2までは傾きがほぼ一定であったため、本研究では、最大荷重の1/2と1/3に相当する点を結んだ直線の傾きとした。初期剛性は、拡張式-Nを除くアンカーで加熱温度の上昇とともに低下する傾向が見られた。加熱によりコンクリート内部に微細なひび割れが生じ、最大荷重前から徐々に破壊が進行したためと考えられる。また、拡張式-Nは、初期剛性が低く、加熱による初期剛性の変化が少ない。初期のアンカー拡張部の支圧によるコンクリートへの固着力が低いためであると考えられる。

拡張式、拡張式アンカーにおいて、接着剤を併用すると接着剤を併用していないアンカーと比べて、大幅に初期剛性が高くなっている。金属系アンカーに接着剤を併用することで、アンカーとコンクリート界面の初期の固

着力を増加させることができると考えられる。

3.3 アンカーの最大荷重における実験値と計算値の比較

ここでは、拡張式-N、拡張式-E、拡張式-C、拡張式-N-E、拡張式-C、拡張式-Cの引抜き時における最大荷重の実験値と計算値の比較を行う。最大荷重は、日本建築学会¹⁾ (式(1))、土木学会⁸⁾ (式(2))、CEB⁹⁾ (式(3))、ACI¹⁰⁾ (式(4))により示されている算定式を用いて算出した。いずれも逆富士状破壊における算定式である。

$$P_{max} = 0.1\varphi\sqrt{\sigma_B \cdot 10} \cdot A_c \quad (1)$$

$$P_{max} = 0.625\varphi\sqrt{\sigma_B} \cdot A_c \quad (2)$$

$$P_{max} = 10.5 \cdot \sigma_B^{0.5} \cdot l_e^{1.5} \quad (3)$$

$$P_{max} = 23.8 \cdot \sigma_B^{0.5} \cdot l_e^{1.5} \quad (4)$$

ここに、 P_{max} : アンカー引抜き時の最大荷重(N), φ : 低減係数, σ_B : 各加熱温度でのコンクリートの圧縮強度(N/mm²), $A_c = \pi \cdot l_e(l_e + D)$: 破壊面の有効水平投影面積(mm²), $l_e = l - D$: 有効埋込み長さ(mm), D : アンカー径(mm)である。式(1), (2)は、安全率を考慮した算

定式であり、低減係数 ϕ が含まれているが、ここでは低減係数 ϕ を 1.0 とし計算を行った。

図-14 に本研究で得られたアンカーの引抜きにおける最大荷重の実験値と式(1)-(4)より算出された計算値との関係を示す。建築学会式は、加熱温度 20℃ から 500℃ までは実験値が計算値を上回っているが、加熱温度 800℃ 以降では、実験値が計算値を下回る場合があることが確認された。土木学会式は、式(1)-(4)の中で実験値と計算値の関係が最も良好となった。しかし、加熱温度 20℃ から 500℃ では、拡張式-N 以外で実験値が計算値を上回っているが、800℃ 以降ではすべてのアンカー実験値が計算値を下回っている。CEB 式は、加熱温度 20℃ から 300℃ までは実験値の方が大きいですが、加熱温度 500℃ 以降では、実験値が計算値を上回る場合があることが確認された。ACI 式は、ほとんどのアンカーにおいて、すべての加熱温度で実験値よりも計算値の方が大きくなっている。

これらのことから、本研究で検討したすべての評価式において、実験値と計算値を比較すると良い相関は得られず、コンクリート母体の圧縮強度から高温加熱を受けたアンカーの最大荷重を推定することは困難であると考えられる。これには、用いるアンカーの種類やそれに伴う引抜き特性の違い、加熱による材料特性の変化など様々な要因が考えられる。これらの関係に関する検討は、今後の課題とする。

4. まとめ

本研究では、加熱温度 20℃ から 1000℃ までの高温環境下に一定時間曝されたコンクリートに埋め込まれたあと施工アンカーの引抜き特性について検討を行い、以下のことが明らかとなった。

- (1) コンクリート表面の破壊面積、破壊深さと加熱温度の関係については、明確な関係性は見られない。
- (2) 加熱温度の上昇とともにアンカー表面に施されているメッキの膨張や、樹脂系接着剤による変色などは確認されたが、加熱自体によるアンカーの変形などは見られない。
- (3) 初期剛性は、ほとんどのアンカーで、加熱温度の上昇とともに低下する傾向が見られた。
- (4) 拡張式、拡張式アンカーに接着剤を併用することで、初期剛性および最大荷重を高くすることができる。また、加熱により接着剤の付着強度が低下しても、アンカーの支圧による固着力により、ある程度の荷重を保つことができる。
- (5) コンクリート母体の圧縮強度から高温加熱を受けたアンカーの最大荷重を推定することは困難であると考えられる。

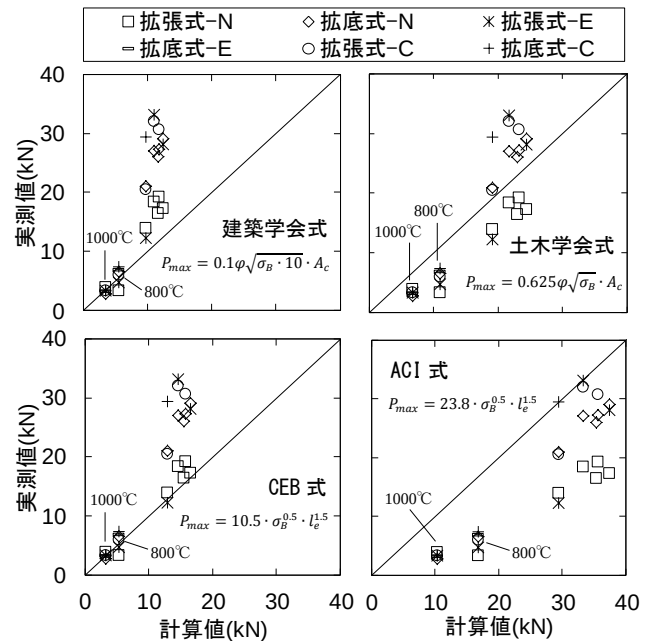


図-14 実験値と計算値との関係

参考文献

- 1) 日本建築学会：各種合成構造設計指針・同解説，2010
- 2) 日本建築学会：構造材料の耐火性ガイドブック
- 3) 上村克郎，小西敏正，橋高義典，関和彦：メカニカルアンカーボルトの引抜き耐力に及ぼすコンクリート母材の性質，第8回コンクリート工学年次講演会論文集，pp.405-408，1986
- 4) 百瀬光広，丸山久一，清水敬二，橋本親典：アンダーカットアンカー型アンカーボルトの性状に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，12-2，pp.801-806，1990
- 5) 橋本純，滝口克己：熱を受けるコンクリート埋め込みボルトの引抜きに関する実験，日本建築学会構造系論文集，No.568，pp.123-129，2003.6
- 6) 大和征良，池田憲一：エポキシ樹脂系注入方式接着系あと施工アンカーの火災時および火災後の付着破壊強度に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，第80巻，第717号，pp.1803-1809，2015.11
- 7) 刈田祥彦，松沢晃一，橋高義典，八木沢康衛：コンクリートに埋め込まれた金属系アンカーボルトの高温加熱後の引抜き特性に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.1，pp.1354-1359，2014
- 8) 土木学会：コンクリートのあと施工アンカー工法の設計・施工指針（案），2014
- 9) fib：CEB233(CEB266)，Design of fastenings in concrete，part1-3，1997
- 10) ACI：ACI-318-05，ACI-318R-05，Building Code Requirements for Structural Concrete and commentary，Appendix D-Anchoring to concrete，2005